

Virtuelle Werkstatt

**Dr.-Ing. B. Jung, Dr. M. Latoschik,
Dipl.-Inform. P. Biermann, Prof. Dr. I. Wachsmuth**
*Technische Fakultät, Universität Bielefeld
Labor für Künstliche Intelligenz und Virtuelle Realität
D-33594 Bielefeld
Tel.: 0521/106-2923, Fax.: 0521/106-2962
E-mail: jung|marcl|pbierman|ipke@techfak.uni-bielefeld.de*

Zusammenfassung

Das im November 2001 begonnene Projekt "Virtuelle Werkstatt" will Forschungsarbeiten aus den Bereichen Multimodale Interaktion und Virtuelles Konstruieren erweitern und derart zusammenführen, daß ihre realitätsnahe Erprobung in der Virtuellen Realität (VR) demonstrierbar wird. Multimodale Interaktion betrifft die unmittelbare Umsetzung von Benutzereingriffen in einer visualisierten 3D-Szene aufgrund von sprachbegleiteten Gesteneingaben. Virtuelles Konstruieren betrifft die Erstellung und Erprobung computergraphisch visualisierter 3D-Modelle geplanter mechanischer Konstruktionen (sog. virtueller Prototypen), um eine realistische Vorabexploration von Entwürfen per Simulation in der Virtuellen Realität zu ermöglichen. Der Einsatz eines Cave-artigen VR-Großdisplays macht hierbei gleichzeitig Benutzerinteraktionen mit sprachbegleiteten Gesteneingaben im Greifraum wie auch im Fernraum erforschbar.

Schlüsselwörter

Künstliche Intelligenz, Virtuelle Realität, Virtuelles Prototyping, multimodale Mensch-Maschine Kommunikation

1 Einleitung: Konstruieren in Virtueller Realität

Im Bereich des Designs und der Konstruktion ist die rechnergestützte Darstellung synthetischer Geometriedaten durch Techniken der Virtuellen Realität (VR) zunehmend wichtig. Ein Hauptziel gegenwärtiger Arbeiten zur VR ist der Brückenschlag zwischen den hauptsächlich generierungsorientierten Bilderzeugungssystemen, welche errechnete Visualisierungen einem überwiegend passiven Benutzer zur Verfügung stellen, und interaktiven Systemen, die in der Lage sind, Benutzereingriffe in einer visualisierten Szene unmittelbar umzusetzen. Für Anwendungen im Konstruktionsbereich sind besonders VR-Systeme interessant, mit denen sich Modelle realer Objekte und deren Herstellungsprozesse

bereits in der Konzeptphase realistisch darstellen und explorieren lassen, vor dem Bau eines physikalischen Produktmodells (Physical Mock-Up). Die Modellierung am Computer ermöglicht einerseits die Übernahme vorhandener CAD-Modelldatenbanken und andererseits ein Probehandeln ohne Materialverbrauch und mit leichter Veränderbarkeit des (immateriellen) Modells. Allerdings ist Wechselwirkung mit den visualisierten Modellen derzeit nur eingeschränkt möglich. Hier bildet die Unterstützung der VR-Technik durch intelligente Funktionen, insbesondere durch semantisch verarbeitbare Repräsentationen, den Ausgangspunkt für ein "virtuelles Konstruieren", das die Gebiete Virtuelle Realität und Künstliche Intelligenz gemeinsam betrifft. Unter Virtuellem Konstruieren wird im folgenden die Erstellung und Erprobung computergraphisch visualisierter 3D-Modelle geplanter mechanischer Konstruktionen sog. virtueller Prototypen (Digital Mock-Ups) mit VR-Techniken verstanden. Die Erstellung virtueller Prototypen erfolgt durch Manipulation CAD-basierter parametrischer Grundbauteile, die zu komplexen Funktionseinheiten zusammengesetzt werden.

Das Ende 2001 begonnene Projekt "Virtuelle Werkstatt" will als übergeordnetes Ziel Forschungsarbeiten aus den Bereichen Multimodale Interaktion in der Virtuellen Realität (VR) und Virtuelles Konstruieren erweitern, vertiefen und derart zusammenführen, daß ihre realitätsnahe Erprobung auf einer generischen Handhabungsplattform demonstrierbar wird. An der Erprobungsdomäne des virtuellen Entwurfs und der virtuellen Montage von CAD-Teilen und Baugruppen eines Kleinfahrzeugs ("Citymobil") verfolgt das Projekt folgende Teilziele:

- Im Bereich der multimodalen Mensch-Maschine-Interaktion mit virtuellen Umgebungen werden in Ergänzung zu sprachbegeleiteten kommunikativen Gesten auch zweihändige manipulative Gesten aufgegriffen. Es soll ein allgemeines und integratives Rahmenwerk für die Erkennung, Interpretation und Umsetzung gestischer und sprachlich-gestischer Eingriffe in der Virtuellen Realität konzipiert und prototypisch realisiert werden, das auch Erkenntnisse aus den Humanwissenschaften über bimanuales Arbeiten (z.B. [GF96]) miteinbezieht.
- Im Bereich des Virtuellen Konstruierens sollen aufbauend bisherigen Arbeiten (z.B. [JKL+00]; siehe auch 3.1) Methoden entwickelt werden, die eine komfortable Erstellung, Modifikation und funktionale Überprüfung von Variantenkonstruktionen in der virtuellen Umgebung ermöglichen. Diese betreffen u.a. wissensgestützte, physikrekonstruierende Einpaßhilfen zur Manipulation virtueller Objekte, die etwa ein paßgenaues Zusammenschnappen zweier virtueller Bauteile leisten.
- Als technisches Ziel soll ein Demonstrator für den Entwurf von Variantenkonstruktionen eines Kleinfahrzeugs in der virtuellen Realität entwickelt werden. Die Veränderung der Konstruktionsentwürfe ist mittels zweihändiger manipulativer Gestik möglich, ergänzt durch Möglichkeiten der kommunikativen Gestik und sprachlicher Eingaben. Grundsätzlich werden im

Demonstratorsystem Besonderheiten der Virtuellen Realität wie 1:1-Darstellung, visuell-auditive Präsentation und Immersion ausgenutzt.



Abbildung 1: Im Projekt „virtuelle Werkstatt“ soll die Konstruktion und Evaluation von Citymobil-Varianten in einer Cave-artigen VR-Installation ermöglicht werden.

2 VR-Installation

Die im Rahmen der Virtuellen Werkstatt stattfindenden Forschungsarbeiten werden in einem neu errichteten Großdisplay-Setup realisiert (Abbildung 1). Bei der Auswahl der dafür benötigten Komponenten wurde besonderer Wert auf den Einsatz innovativer, vergleichsweise kostengünstiger Technologien gelegt, welche insbesondere auch ein kabelfreies Arbeiten ermöglichen. Die Cave-artige 3 Seitenprojektion (zwei Wände und ein Boden bilden eine gemeinsame Ecke) der Firma 3Dims arbeitet auf Basis von 6 D-ILA Projektoren mit einer nativen Auflösung von je 1365x1024. Zur Erzeugung des Stereoskopieeffektes kommen dabei Zirkularpolarisationsfilter zum Einsatz. Als Besonderheit dieses Systems lässt sich eine der beiden Seiten "versenken", um so etwa einer größeren Anzahl von Zuschauern Einblick zu gewähren. Ein optisches Tracking-System der Firma ART arbeitet Marker-basiert und gewährleistet eine von äußeren Einflüssen (etwa eingebrachten Metallen bei einem elektromagnetischen Prinzip) ungestörte effektive Datenrate von 60Hz mit hoher Güte in Bezug auf Latenzzeiten und „Jitter“-Effekte. Als weitere Eingabegeräte kommen zwei kabelfreie Datenhandschuhe sowie ein Funkmikrophon zum Einsatz. Als Simulations- und Render-System dient ein über ein Hochgeschwindigkeitsnetzwerk (Myrinet)

verbundenes, unter Linux betriebenes Clustersystem der Firma Artabel. Dieses besteht aus insgesamt 6 Doppelprozessor-Compute-Servern und 8 synchronisierten Render-Nodes (mit NVidia Grafik) auf Basis von PC Technologien. Die Verteilung der Graphikprimitive auf die Render-Nodes erfolgt dabei über einen speziellen OpenGL Layer, welcher mittels eines sort-first Ansatzes die zu den einzelnen Views (hier den Projektionsseiten) zu schickenden Primitive bestimmt und diese anschließend über das Myrinet an die entsprechenden Render-Nodes versendet.



Abbildung 2: Zusammenbau CAD-basierter Bauteile mit dem Virtuellen Konstrukteur: Links wird die Abgasanlage eines Automobils mittels sprachlicher Instruktionen zusammengesetzt (IGES-Datensatz der Volkswagen AG). Rechts wird das aus dem CAD-System "Solidworks" importierte "Universal Joint" (Kreuzgelenk) mittels direkter Manipulation gebaut.

3 Virtuelles Konstruieren

Im Bielefelder Labor für Künstliche Intelligenz und Virtuelle Realität steht mit dem Virtuellen Konstrukteur seit längerem System zur Verfügung, das interaktive Montagesimulationen mit dreidimensional modellierten Grundbausteinen ermöglicht [Jung et al 2000]. Zielsetzung ist, daß alle im Realen aus einer gegebenen Menge von Grundbauteilen physikalisch konstruierbaren Aggregate auch in der virtuellen Umgebung herstellbar sind. Neben den Standardinteraktionen herkömmlicher Graphiksysteme wie Navigation und Objekttranslation erlaubt der Virtuelle Konstrukteur die Echtzeitsimulation montagebezogener Manipulationen: paßgenaues Fügen und Trennen von Bauteilen und Aggregaten und die Modifikation erzeugter Aggregate durch Relativbewegung (Rotation und Translation) von Bestandteilen gemäß verbindungsartspezifischer Freiheitsgrade. Benutzereingaben erfolgen in der

Desktop-Version des Virtuellen Konstrukteurs durch mausbasierte Manipulation bzw. einfache sprachliche Instruktion (Abb. 2).

3.1 Wissenbasierte Modellierung von Verbindungseigenschaften

Grundlage der Montagesimulation im Virtuellen Konstrukteur ist ein allgemeiner, wissensbasierter Ansatz zur Modellierung der Bauteilverbindungsmöglichkeiten [JKL+00]; er beruht auf der expliziten Modellierung verschiedener Arten von Verbindungsstellen (Ports) der virtuellen Bauteile, z.B. dem Schaft einer Schraube oder dem Gewinde einer Mutter, sowie verschiedener Typen von Verbindungsbeziehungen zwischen den Verbindungsports, z.B. Schrauben oder Stecken. Auf Basis verschiedener Baukastensysteme, die von Baufix-Holzbauteilen bis hin zu industriellen, CAD-basierten Grundbausteinen (z.B. Auspuffanlage eines VW Polo) reichen, wurde dazu eine Wissensbasis mit taxonomisch angeordneten Porttypen entwickelt. Die Top-level Konzepte sind ExtrusionPort (spezialisiert in GeberPort und NehmerPort), womit z.B. Schraubverbindungen modelliert werden, PlanePort, mit dem Objektverbindungen an koplanaren Flächen modelliert werden, sowie PointPort, womit punktartige Verbindungen ohne translatorische Freiheitsgrade modelliert werden. Daneben werden im Virtuellen Konstrukteur verschiedene Verbindungsarten modelliert, wie sie auch in der Konstruktionslehre z.B. nach physikalischen Schlußkräften oder verbleibenden Freiheitsgraden unterschieden werden [Kol84; Rot94]. So kann in der Montagesimulation z.B. weiter zwischen Stecken (Translation und Rotation ungekoppelt), Schrauben (Translation und Rotation gekoppelt) oder Schweißen (keine Freiheitsgrade) unterschieden werden. Die verschiedenen Verbindungen werden als Relationen zwischen Verbindungsports beschrieben und ebenfalls in einer Hierarchie angeordnet. Zur Spezifikation von Port- und Verbindungsart-bedingten Bewegungseinschränkungen verbundener Objekte wurde das Beschreibungsmittel der erweiterten Freiheitsmatrizen entwickelt [Kop98]. Diese basieren auf den logischen Freiheitsmatrizen, die in der Konstruktionslehre als digitale Darstellungen der Berührungen zweier Körper in diskreten Punkten definiert sind [Rot94] und ermöglichen u.a. die Beschreibung der verbleibenden möglichen Relativbewegungen von Bauteilen, die in der virtuellen Umgebung verbunden wurden. Bei der Simulation von Fügehandlungen wird Wissen über die Verbindungsports und die Verbindungsarten zur Herstellung und zur weiteren Modifikation von Objektverbindungen ausgenutzt. Zur Überprüfung der prinzipiellen Verbindbarkeit zweier Bauteile werden dabei für jeweils zwei Ports der zu verbindenden Objekte verschiedene Bedingungen getestet (Gleichartigkeit, geeignete Positionierung, ausreichende Kapazitäten, passende Geometrien, kompatible Verbindbarkeiten). Insbesondere stellen diese Bedingungen eine Verallgemeinerung der im Kontext der robotischen Montageplanung formulierten Kontaktbedingungen nach [PAB80] dar und bieten

mit erweiterten Freiheitsmatrizen einen allgemeinen Ansatz zur Beschreibung von Objektverbindungen, wie er z.B. in [HN97] gefordert wird.

3.2 Virtueller Entwurf mit Bauteilskalierung

Wesentlich beim Entwurf von Variantenkonstruktionen ist die Größenanpassung der Bauteile an individuelle Erfordernisse. Dabei ist die Möglichkeit nicht-uniformer Skalierung wichtig, z.B. wenn ein Rahmenteil oder der ganze Rahmen länger, aber nicht breiter ausgelegt werden soll. Nicht-uniforme Skalierungen werden derzeit in VR-Prototyping-Umgebungen wenn überhaupt nur für einfache Sonderfälle unterstützt. Hier sind folgende Probleme zu lösen: (1) Datenstrukturen zur Kollisionserkennung sind bei veränderter Bauteilgeometrie dynamisch zu berechnen; (2) Teile der Geometrie müssen charakteristische Formeigenschaften bewahren, z.B. dürfen Bohrungen bei Längenskalierung nicht mit skaliert werden; (3) die Lage von Verbindungsstellen der Bauteile ändert sich bei Skalierung, Modelle der Verbindungsports sind dynamisch anzupassen.

Die Modellierung nichtuniform skalierbarer Teile beruht auf parametrischen Festkörpern, deren Dimensionsparameter (Länge, Breite, Tiefe) zur Laufzeit veränderbar sind. Geometrie-, Verbindungsport- und Kollisionsdaten werden systemseitig in Abhängigkeit von aktuellen Dimensionsparametern angepaßt. Die nicht-uniforme Skalierung der Bauteilgeometrie beinhaltet den Einsatz von CSG (Constructive Solid Geometry) Methoden, welche z.B. das Ausschneiden von Loch-Features aus Primitiven leisten. Einerseits wird zur Realisierung der CSG-Fähigkeit auf das ACIS-Modeling System zurückgegriffen, welches polygongenaue Bauteilgeometrien erzeugt, wie sie etwa zur Kollisionsprüfung benötigt werden.

Um andererseits den Echtzeitanforderungen der VR gerecht zu werden, etwa bei per direkter Manipulation durchgeführten Skalierungsoperationen, wurde eine alternative Methode entwickelt, welche den Effekt von CSG-Operationen rein visuell erzeugt. Die Repräsentationen der Bauteile und ihrer Assembly-Features werden dazu als besondere Knoten in die vorhandene Szenengraph-Struktur (Avango [Tra99]) eingefügt, welche eine echtzeitfähige Darstellung über OpenGL erlauben. Die Realisierung besteht aus drei Szenengraph-Knoten: einem Hauptknoten (prCSGGoldfeather) und zwei Hilfsknoten (prCSGPos und prCSGNeg), welche die Ausprägung ihrer Kind-Knoten bestimmen. Diese können ein positives oder ein komplementäres CSG-Teilstück darstellen. Abbildung 3 zeigt einen Szenengraph-Ausschnitt, der eine Leiste mit drei zylindrischen Löchern realisiert. Der Hauptknoten blockiert im Render-Durchlauf die normale Darstellung seiner Kind-Knoten und löst stattdessen ein eigenes Multipass-Rendering aus, das durch einen modifizierten Goldfeather-Algorithmus [GHF86] realisiert ist. Da die ursprüngliche Realisierung des Goldfeather-Algorithmus in

OpenGL stark auf Pixel-Transfers zwischen Tiefen-Buffer und Hauptspeicher setzt, welche in einen Render-Cluster mit verteiltem OpenGL zu Performanzeinbrüchen führt, musste der Algorithmus so angepasst werden, dass die Operationen nur jeweils im lokalen Stencil-Buffer der einzelnen Render-Clients durchgeführt werden. Da dieser Algorithmus im allgemeinen mehr Ebenen des Stencil-Buffers benötigt als der ursprüngliche Goldfeather-Algorithmus, werden weitere Optimierungen vorgenommen, wie z.B. der Test auf Überschneidung von komplementären Teilen (siehe auch [TE00]).

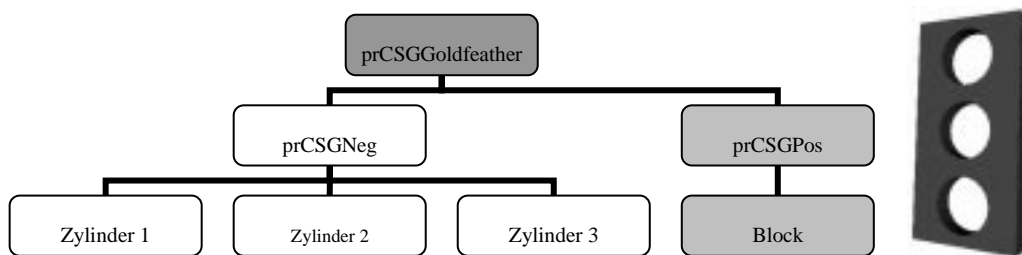


Abbildung 3: Ausschnitt des Szenengraphs für die CSG-Modellierung einer Leiste mit drei zylindrischen Löchern. Die Leiste kann interaktiv in beliebigen Dimensionen skaliert werden, wobei die Kreisförmigkeit der Löcher erhalten bleibt.

Die beiden CSG-Verfahren werden wie folgt kombiniert: Im Verlauf einer per direkter Manipulation durchgeführten Skalierungsoperation wird das Bauteil rein visuell skaliert, was dem Anwender ein unmittelbares visuelles Feedback während der Skalierung ermöglicht. Nach Abschluß der Skalierungsoperation wird eine polygonale Repräsentation der Bauteilgeometrie mithilfe des ACIS-Modelers aufgebaut, welche z.B. Grundlage für folgende Kollisionsprüfungen ist. Zusätzlich werden auch die Portmodellierungen an die neuen Bauteilgeometrien angepaßt, so daß die Verbindungseigenschaften der Bauteile der aktuellen Geometrie entsprechen.

4 Multimodale Interaktion mit Sprache und Gestik

Die Benutzerinteraktion mit der visualisierten 3D-Szenen erfolgt multimodal mit Hilfe von sprachbegleiteten Gesteneingaben. Im 1999 abgeschlossenen SGIM-Projekt [Lat01a] wurden Grundlagentechniken entwickelt, die mittels 6DOF- und Bimetallsensoren Informationen über die Bewegungsrichtung der oberen Extremitäten und die Position eines Benutzers bei der Interaktion mit Großdisplays in Multimedia-Umgebungen erschließen. Dazu gehört die signaltechnische Erfassung und Bedeutungsanalyse von Körpergestik (vor allem

Arme und Kopfstellung des Benutzers), die Analyse von Spracheingaben, die Integration der Gesten und Spracheingaben sowie die Kopplung in Echtzeit-basierte immersive Anwendungssysteme. Bei der Umsetzung dieser Aufgaben wurde insbesondere Wert auf eine kompositionelle Zerlegung der benötigten Funktionen unter Berücksichtigung und Erweiterung aktueller Ansätze zur VR-Modellierung gelegt (vgl. Standards VRML97, X3D oder Forschungsprototypen wie AVANGO etc.). Die entwickelten Konzepte wurden als Baukastensystem für die Modellierung multimodaler Interaktion in der VR realisiert. Ein Beispiel für eine damit realisierte Anwendungsmodellierung zeigt Abbildung 4.

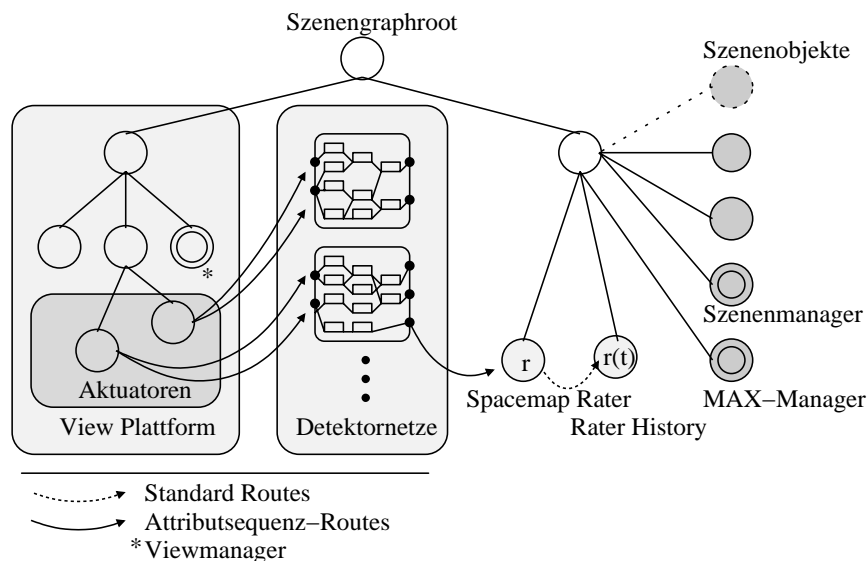


Abbildung 4 Beispiel einer Anwendungsstruktur für die Realisierung multimodaler Interaktion in VR: Aktuatoren bilden eine Benutzer- und Sensorikabstraktionsebene. Die Gestenerkennung erfolgt mittels in die Szenenstruktur eingebetteter Detektornetze. Spezielle Szenengraphknoten wie Spacemap und History führen eine Voranalyse der veränderlichen Szene im Hinblick auf eine zeitversetzte Analyse deiktischer Referenzen durch. Andere Knotentypen (Manager) etablieren eine Kommunikation mit weniger zeitkritischen Komponenten zur Wissensrepräsentation. Attributsequenzen erlauben einfache Datenfluss-verschaltungen ähnlich den Feldkonzepten bei VRML, arbeiten aber anders als diese asynchron zur Renderpipeline.

Die entwickelte Gestenerkennung auf Basis des ProSA-Rahmensystems [Lat01b] basiert auf der Detektion definitorischer Merkmale, die sowohl die Form als auch den zeitlichen Verlauf einer Geste betreffen. Als Formmerkmale werden Fingerstellung, Handorientierung und -position betrachtet; expressive Elemente, die auf das Vorliegen einer bedeutungstragenden Geste hinweisen, sind

Ruhepunkte, hohe Beschleunigungen, Symmetrien und Abweichungen von Ruhestellungen bei Handspannung und der Handposition. Realisiert wurden bislang Erkenner für die universellen Basisinteraktionen (Pointing, Grasp, GraspRelease, Rotation, Translation). Bei der sprachlich-gestischen Interaktion werden bislang drei Typen kommunikativer Gesten ausgewertet: Deiktische Gesten ("nimm <Zeigegeste> dieses Teil") spezifizieren ein Objekt oder einen Ort der virtuellen Umgebung, mimetische Gesten ("drehe es <kreisender Zeigefinger> so herum") qualifizieren die Ausführung einer Aktion, und ikonische Gesten ("das so <Andeutung eines Zylinders durch die Handform> geformte Objekt ...") werden zur Objektreferenz verwendet. Zwei dieser Beispielinteraktionen werden in Abbildung 5 veranschaulicht.



Abbildung 5 Zwei multimodale Interaktionsbeispiele. Linkes und mittleres Bild: „Nimm [Zeigegeste] dieses Rohr und verbinde es mit [Zeigegeste] dem Teil“. Rechtes Beispiel: „Und nun drehe es so [Start mimetische Geste] herum [Ende mimetische Geste]“.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden aktuelle Arbeiten im Projekt „Virtuelle Werkstatt“ vorgestellt. Mit den dargestellten Methoden kann z.B. ein Citymobil aus seinen Hauptkomponenten in verschiedenen Varianten in VR zusammengesetzt werden. Über reine Montageprüfungen hinausgehend, zielen die Forschungsarbeiten in der virtuellen Werkstatt auch auf die Unterstützung von Konstruktionsaufgaben. Dazu werden Techniken entwickelt, die eine interaktive Skalierung einzelner Bauteile sowie ganzer Baugruppen unter Aufrechterhaltung ihrer semantisch repräsentierten Verbindungseigenschaften ermöglichen. Die Mensch-Maschine-Interaktion in der Cave-artigen VR-Installation beruht auf sprachlichen, durch kommunikative Gesten ergänzte Eingaben sowie in Zukunft zweihändigen manipulativen Gesten zur Interaktion mit Bauelementen im Fern- bzw. Greifraum.

Weitere zukünftige Arbeiten betreffen u.a. funktionale Überprüfungen (z.B. Freigangprüfungen) von interaktiv modellierten Variantenkonstruktionen sowie

die Netzwerkverteilung der virtuellen Umgebung zur Erschließung von Anwendungen im Concurrent Engineering.

Weitere Informationen zur Virtuellen Werkstatt finden sich auf der Projekt-Homepage <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/ags/wbski/werkstatt/>. Das Projekt "Virtuelle Werkstatt" wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

- [GF96] Y. Guiard & T. Ferrand: Asymmetry in Bimanual Skills. In *Manual Asymmetries in Motor Performance*, CRC Press, 1996.
- [GHF86] J. Goldfeather, J. P. M. Hultquist, and H. Fuchs. Fast constructive-solid geometry display in the Pixel-Powers graphics system. In D. C. Evans and R. J. Athay, editors, *Computer Graphics (SIGGRAPH 86 Proceedings)*, volume 20, pages 107-116, August 1986.
- [HN97] B. W. Henson and N. P. Juster. Information requirements for the support of assembly mating conditions. In *Proceedings of DETC'97*, Sacramento, CA, September 1997. ASME.
- [JKL+00] B. Jung, S. Kopp, M.E. Latoschik, T. Sowa & I. Wachsmuth: Virtuelles Konstruieren mit Gestik und Sprache. *KI – Künstliche Intelligenz 2/00*, Themenheft zum Schwerpunkt "Intelligente virtuelle Umgebungen", April 2000, 5-11.
- [Lat01a] M. E. Latoschik: Multimodale Interaktion in Virtueller Realität am Beispiel der virtuellen Konstruktion. *Phd thesis, Faculty of Technology, University of Bielefeld*, infix DISKI volume 251, Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH, Berlin, 2001
- [Lat01b] M. E. Latoschik: A Gesture Processing Framework for Multimodal Interaction in Virtual Reality. In A. Chalmers and V. Lalioti, editors, *Afrigraph 2001, 1st International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality and Visualization in Africa, 5 - 7 November 2001*, New York, NY 10036, 2001, ACM SIGGRAPH, pp. 95-100
- [Kop98] S. Kopp. *Ein wissensbasierter Ansatz zur Modellierung von Verbindungen für die virtuelle Montage*. Diplomarbeit, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, März 1998.
- [Kol84] R. Koller. Entwicklung einer Systematik für Verbindungen – ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. In *Konstruktion*, 36(5):173-180, 1984.
- [PAB80] R.J. Popplestone, A. P. Ambler, and I. M. Bellos. An interpreter for a language for describing assemblies. *Artificial Intelligence*, 14(1):79-107, August 1980.
- [Rot94] K. Roth. *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, volume I*. Springer, Berlin, 2nd edition, 1994.
- [TE00] R. F. Tobler, G. Erhart. General Purpose Z-Buffer CSG Rendering with Consumer Level Hardware. Technical Report *TR VRVis 2000-003*, VRVis Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung Forschungs-GmbH, 2000.
- [Tra99] H. Tramberend: A Distributed Virtual Reality Framework. In *Proceedings Virtual Reality*, 1999.